

Aus der Augenklinik und Poliklinik der Freien Universität Berlin

Klinikum Westend

Direktor: Professor Dr. med. J. Wollensak

DAS VERHALTEN DES AUGENBINNENDRUCKES UNTER
REPRODUZIERBARER KÖRPERLICHER BELASTUNG;
ZUSAMMENHÄNGE MIT KREISLAUFPARAMETERN
UND SÄUREN-BASENHAUSHALT

INAUGURAL-DISSERTATION

zur

Erlangung der medizinischen Doktorwürde

an den

Medizinischen Fachbereichen der Freien Universität Berlin

vorgelegt von

Jörg Höllge

aus Potsdam

1972

Aus der Augenklinik und Poliklinik der
Freien Universität Berlin, Klinikum Westend
Direktor: Prof. Dr. med. J. WOLLENSACK

DAS VERHALTEN DES AUGENBINNENDRUCKES UNTER
REPRODUZIERBARER KÖRPERLICHER BELASTUNG;
ZUSAMMENHÄNGE MIT KREISLAUTPARAMETERN
UND SÄUREN- BASENHAUSHALT

Inaugural - Dissertation
zur
Erlangung der medizinischen Doktorwürde
an den Medizinischen Fachbereichen
der Freien Universität Berlin

vorgelegt von
H ö l l g e , Jörg
geb. in Potsdam

R e f e r e n t : Professor Dr. med. J. Wollensak

K o r r e f e r e n t : Professor Dr. med. H. Gasteiger



Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen
Fachbereiche der Freien Universität Berlin

Promoviert am: 3. Juli 1972

Gliederung

	Seite
I. Einleitung	1
II. Versuchspersonen und Methodik	3
1. Versuchspersonen	3
2. Versuchsanordnung	3
3. Registrierte Parameter	4
III. Ergebnisse und Diskussion der eigenen Versuche	6
1. Puls	6
2. Blutdruck	8
3. Augenbinnendruck	9
4. arterieller pH	11
5. base excess	12
6. Standard-Bikarbonat	13
7. Kohlensäurepartialdruck	13
IV. Korrelationsstatistische Parameter	14
1. Herzfrequenz und Augenbinnendruck	15
2. Blutdruck und Augenbinnendruck	16
3. Säuren-Basenhaushalt und Augenbinnendruck	19
V. Zusammenfassung der Ergebnisse	24
VI. Diskussion der eigenen Versuche mit denen der Literatur	25
VII. Tabellarischer Anhang	32
VIII. Literaturverzeichnis	36

I. Einleitung

Das Verhalten des Augenbinnendruckes nach Muskelarbeit wurde von einer ganzen Reihe von Autoren mit teilweise sehr unterschiedlichem Ergebnis untersucht.

Sichtet man die verschiedenen Arbeiten nach Art und Weise der körperlichen Belastung, so fällt auf:

Bei Haltearbeit unter Kontraktion der Abdominal- und Thorakalmuskulatur (COMBERG und STOEWER, BIRO und BOTAR, JANISZEWSKA - ZYGIER) und ebenso beim Valsalva-Versuch (BIRO und BOTAR) wird über einen Anstieg der oculären Tension berichtet, während nach starker körperlicher Belastung und aktiver Muskelarbeit bis auf wenige Ausnahmen (BARDANZELLU, KERN) unterschiedliche Drucksenkungen gegenüber dem Ausgangswert gefunden werden (BIRO und BOTAR, LEMPERT, COOPER, CULVER und TREDICI, LEIGHTON und PHILLIPS, STEWARDT, LE BLANC und BECKER). LEMPERT und Mitarb. äußerten die Vermutung, daß Art und Weise der Belastung, unterschiedliche Meßintervalle und die körperliche Verfassung der Untersuchten für die differierenden Ergebnisse verantwortlich zu machen seien und lieferten dafür erste Beweise. Trotzdem fehlt bisher eine genaue Aussage darüber, wie sich die

oculäre Tension in Abhängigkeit von Höhe und Dauer der körperlichen Arbeit, vor allem auch während des Arbeitsvorganges verhält. Noch weniger ist über den Mechanismus der Drucksenkung und eventuelle Beziehungen zu anderen physiologischen Veränderungen bei erschöpfender Muskelarbeit bekannt. Die zur Klärung dieser Frage unternommenen Versuche sind bisher ohne befriedigendes Ergebnis geblieben (KÜCHLE und ROHRSCHEIDER, STEWARDT, LE BLANC und BECKER).

Bei einigen der in der Literatur vorliegenden Untersuchungen wurde eine Mituntersuchung der Kreislaufparameter vorgenommen. Den Veränderungen im Säuren-Basenhaushalt, die eine wesentliche Verschiebung während körperlicher Anstrengung erfahren, schenkte man jedoch nur in wenigen experimentellen Studien Aufmerksamkeit (KÜCHLE und ROHRSCHEIDER).

In letzter Zeit ist verschiedentlich über die Wirkung veränderter arterieller Gasspannungen auf den intra-ocularen Druck berichtet worden (KAUFMANN, SCHOTTE und HOLTSMANN; HOLTSMANN, KAUFMANN und SCHOTTE). Es handelt sich hierbei im wesentlichen um respiratorisch erzeugte Veränderungen der arteriellen O_2 - bzw. CO_2 -Spannungen unter Ruhebedingungen. Bei erschöpfender körperlicher Arbeit kommt es bekanntlich ebenfalls zu Verschiebungen arterieller Gaskonzentrationen, insbesondere zu einem Absinken des CO_2 -Spiegels, das in diesem Fall auf eine metabolische Azidose zurückzuführen ist.

Aufgabe der vorliegenden Arbeit war es nun, erstens das Verhalten des Augenbinnendruckes unter reproduzierbaren Belastungen und steady-state-Bedingungen zu untersuchen, zweitens sollten gleichzeitige Veränderungen der Kreislaufparameter und der Parameter des Säuren-Basenhaushaltes erfaßt werden. Darüberhinaus sollte der Versuch gemacht werden, zu weiteren Aussagen über den Einfluß des körperlichen Trainingszustandes und des Geschlechtes zu kommen.

II. Versuchspersonen und Methodik

1. Versuchspersonen

Als Versuchspersonen nahmen 22 männliche und 3 weibliche Probanden im Alter zwischen 18 und 32 Jahren an den Untersuchungen teil; das Durchschnittsalter betrug 26,1 Jahre. Sämtliche Teilnehmer waren körperlich gesund, drei von ihnen führten regelmäßiges körperliches Training durch. Bei allen Probanden bestanden Normalsichtigkeit und normaler Augenbefund. (Die Teilnehmer sind unter Angabe von Alter, Körpergröße, Gewicht und Beruf in Tab. 1, S. 32 im Anhang aufgeführt.)

2. Versuchsanordnung

Die Belastung erfolgte durch Fahrradergometerarbeit auf dem Ergometer nach Astrand (Fa. Monark) im Liegen. Während einer 20-minütigen Ruhepause vor Arbeitsbeginn wurden die EKG-Elektroden und die Blutdruckmanschetten angelegt. Die Arbeit setzte sich aus Stufenbelastungen von je 50 Watt und 5 Minuten Dauer zusammen, um steady-state-Bedingungen zu erhalten. Die Frequenz betrug 50 U/min. Nach Durchfahren der 150-Watt-Stufe

wurde die Belastung nicht mehr erhöht, sondern der Proband fuhr je nach Motivation bis er die Kriterien der Ausbelastung, d.h. eine Pulsfrequenz über 170/min erreicht hatte oder, wie in den meisten Fällen, bis zur völligen Erschöpfung. Bei den drei weiblichen Teilnehmerinnen betrugen die entsprechenden Belastungsstufen jeweils 40 Watt, die Endstufe war also mit 120 Watt erreicht.

Die Messungen der untersuchten Parameter wurden gleichzeitig, jeweils vor Belastungsbeginn, in der 4. bis 5. Minute jeder Belastungsstufe, während Maximalbelastung und nach Arbeitsabbruch in der 3., 5. und 10. Erholungsminute vorgenommen.

In einer Nebenuntersuchung wurde der Augenbinnendruck in gleichen Abständen wie bei den Belastungsversuchen gemessen, während der Proband ruhig auf einer Liege lag. Hiermit sollte ein eventueller Tonographieeffekt festgestellt werden.

3. Registrierte Parameter

O c u l ä r e T e n s i o n : Die Messungen des Augenbinnendruckes erfolgten mit einem geeichten Schiötz-Tonometer (5,5 g) in der 4. Belastungsminute. Zu Beginn eines jeden Versuches wurde der Augenbinnendruck beiderseits auch applanatorisch ermittelt. Es wurden stets beide Augen gemessen, wobei in der Reihenfolge immer zwischen linkem und rechtem Auge abgewechselt wurde, um eventuelle zeitbedingte Differenzen auszugleichen. Wo es nicht gelang, die Tonometermessung während der Arbeit vorzunehmen (dies war meist auf der letzten Stufe und bei Maximalbelastung der Fall), wurde die Versuchsperson angewiesen, kurz mit dem Treten aufzuhören, bis die Messung beendet war. Die längsten, dadurch aufgetretenen Verzögerungen beliefen sich auf eine halbe Minute.

Blutdruck: Der Blutdruck wurde halbautomatisch und beidseitig über Korotkoff-Mikrophone des Infraton- Ophthalmodynamographen nach Hager und Otto registriert und mit einem 6-Kanalschreiber der Firma Schwarzer aufgezeichnet.

Pulsfrequenz: Die Auszählung der Pulsfrequenz erfolgte nach der R-Zacke des EKG's, das mit Hilfe von Brustwandelektroden abgeleitet wurde.

Bestimmung des pH: Der arterielle pH wurde aus dem Kapillarblut des hyperämisierten Ohrläppchens mit Hilfe der Astrup-Mikro-Ausrüstung (Fa. Radiometer Kopenhagen) bestimmt. Nach den Angaben von SIGGAARD - ANDERSEN wurden die Werte für Standard bikarbonat (SB), arteriellen Kohlen-säurepartialdruck (PaCO_2) und Basenüberschuß (BE) durch Äquilibrieren des Blutes mit bekannten CO_2 -Konzentrationen nomographisch ermittelt.

Die Temperatur im Laboratorium lag im Behaglichkeitsbereich. Die Versuche fanden immer zu gleichen Tageszeiten statt, um zirkadiane Schwankungen des Augenbinnendruckes nicht in die Meßergebnisse eingehen zu lassen.

Statistik: Die Formeln zur Berechnung von Mittelwert $\bar{x}$, Standardabweichung s , Korrelationskoeffizient r und Regressionsgeraden entstammen den "Statistischen Auswertungen" von SACHS. Die Mittelwertvergleiche wurden mit dem t-Test für gepaarte Daten vorgenommen.

III. Ergebnisse und Diskussion der eigenen Versuche

1. Puls

Von den 25 untersuchten Personen erfüllten 15 männliche und zwei weibliche Probanden die erforderlichen Kriterien, d.h. sie erreichten eine Pulsfrequenz über 170 pro Minute. Bei den übrigen Teilnehmern wurde die Arbeit nach Erreichen von Pulsfrequenzen über 160/min abgebrochen, entweder weil die Motivation zu höherer Leistung ungenügend war, oder weil die Belastung nicht hoch genug lag, wie sich bei den Trainierten zeigte. Ein Leistungssportler hatte z.B. nach 14 Minuten auf der 150-Watt-Stufe erst eine Pulsfrequenz von 159/min erreicht.

Entsprechend der unterschiedlichen Endleistung wurden bei der Auswertung zunächst zwei Gruppen gebildet. In Gruppe A sind alle männlichen Versuchspersonen zusammengefaßt, die eine Herzfrequenz über 170/min erreichten, Gruppe B enthält die übrigen männlichen Teilnehmer, die unter der geforderten Endfrequenz blieben. Als Gruppe C werden in der weiteren Betrachtung die drei weiblichen Versuchspersonen bezeichnet.

Wie zu erwarten, bestanden zwischen den Gruppen geringe quantitative Unterschiede: In Gruppe B lagen die auf den einzelnen Stufen erreichten Herzfrequenzen durchschnittlich um ca. 8 Pulse niedriger als in der A-Gruppe. Die entsprechenden Maximalfrequenzen betrugen sogar 159/min und 179/min. Die weiblichen Versuchspersonen erreichten eine durchschnittliche Endfrequenz von 174/min (s. Abb. 1).

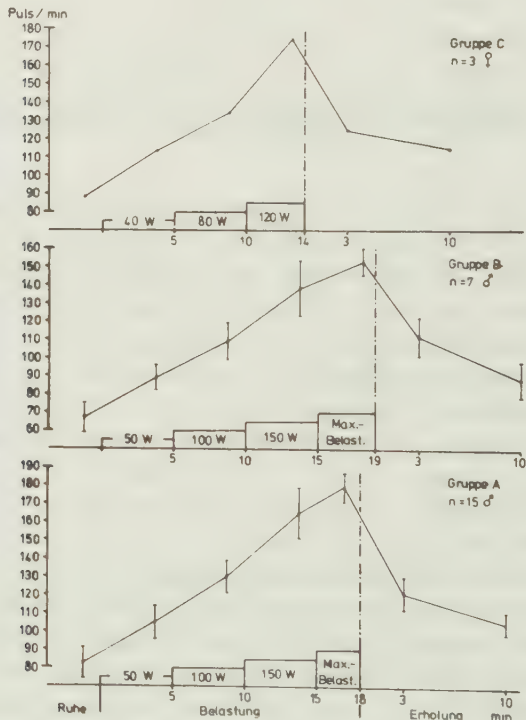


Abb. 1: Verhalten der Pulsfrequenzen mit Standardabweichungen auf den einzelnen Belastungsstufen für die drei Leistungsgruppen A, B und C.

2. Blutdruck

Der Blutdruck (vgl. Abb. 2) zeigt das für ansteigende Stufenbelastung typische Verhalten: langsamer Anstieg des systolischen Wertes bis über 200 mmHg bei nur geringem Anstieg des diastolischen Wertes während der höheren Belastungsstufen, insgesamt also ausgeprägte Amplitudenvergrößerung. Nach Arbeitsabbruch kommt es zu einem schnellen Abfall sowohl des systolischen als auch des diastolischen Druckes, der einige Minuten lang deutlich unter den Ausgangswert sinkt.

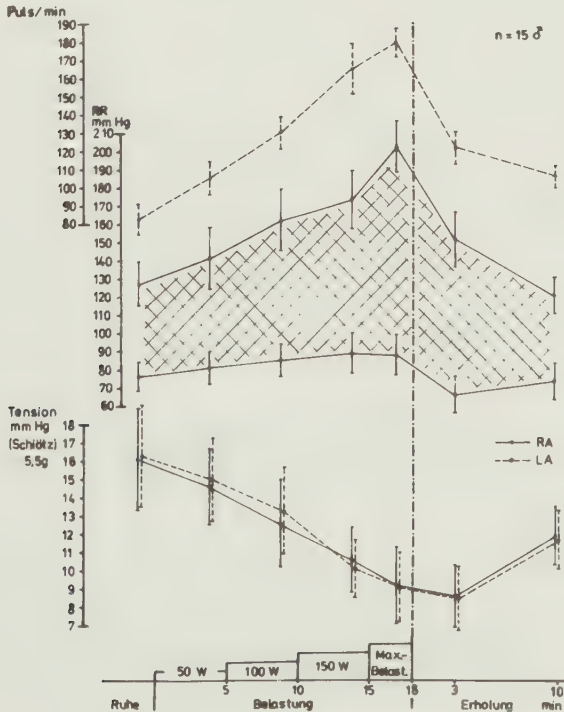


Abb. 2: Pulsfrequenz, Blutdruck und oculäre Tension mit Standardabweichungen auf den einzelnen Belastungsstufen der Gruppe A.

3. Augenbinnendruck

Die mittleren Applanationswerte sämtlicher Augen in Ruhe betrugen für das rechte Auge 14,81 mmHg ($\pm 1,82$), für das linke Auge 14,77 mmHg ($\pm 1,94$), die entsprechenden Werte für die Schiötz-Messungen lagen rechts bei 15,70 mmHg ($\pm 2,54$), links bei 15,79 mmHg ($\pm 2,53$). Vier Minuten nach Arbeitsbelastung mit 50 Watt war der Augenbinnendruck bei allen Versuchspersonen schon deutlich gesunken: in Gruppe A um durchschnittlich 1,4 mmHg, entsprechend um 1,5 mmHg in Gruppe B und 1,3 mmHg in Gruppe C (vgl. Abb. 3, S. 10).

Die Senkung war in Gruppe A und B nach dem t-Test signifikant ($\alpha \leq 0,001$).

Mit zunehmender Belastung und steigender Herzfrequenz kam es zu einem weiteren Absinken der oculären Tension bis auf 9,2 mmHg ($\pm 2,0$) bei Maximalbelastung in Gruppe A, entsprechend bis auf 8,9 mmHg ($\pm 1,9$) in Gruppe B. Die Werte auf jeder Stufe waren nicht nur von der Ausgangstension, sondern auch untereinander signifikant verschieden. Zu einem steileren Abfall in der sonst relativ gleichmäßig absinkenden Kurve des Augenbinnendruckes kam es in den letzten Belastungsstufen ab etwa 150 Watt.

Drei Minuten nach Arbeitsabbruch war der Augenbinnendruck gegenüber den Werten bei Maximalbelastung noch geringfügig weiter gefallen, in Gruppe A um durchschnittlich 0,7 mmHg, in Gruppe B um durchschnittlich 0,4 mmHg. Dies bedeutet einen maximalen Fall gegenüber dem Ausgangsdruck von 45,9 %. Schon 10 Minuten nach Arbeitsabbruch war die oculäre Tension wieder deutlich angestiegen, durchschnittlich bis auf 11,8 mmHg in den Gruppen A und B.

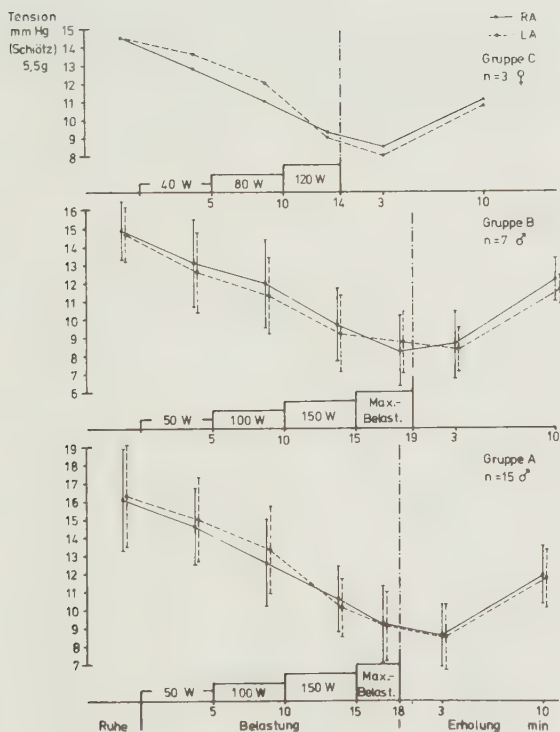


Abb. 3: Gruppe A, B und C,
Verhalten der oculären Tension auf den
verschiedenen Belastungsstufen mit
Standardabweichungen (vgl. Text S. 9).

4. arterieller pH

Die Kurve des arteriellen pH zeigt den für die hier gewählte Form der Arbeitsbelastung typischen Verlauf: zunächst flachen, mit höherer Belastung dann steilen Abfall in den sauren Bereich mit Maximalwerten von 7,29 in der dritten Minute nach Arbeitsabbruch und anschließenden langsamen Wiederanstieg (vgl. Abb.4 unten).

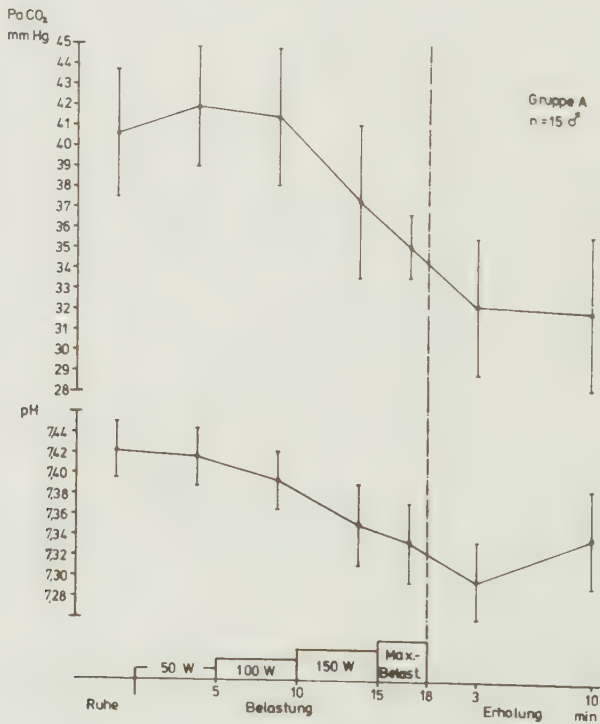


Abb. 4: Gruppe A, Verhalten von arteriellem Kohlen- säurepartialdruck und pH während standardi- sierter Ergometerbelastung mit Standardab- weichungen.

5. base excess (BE)

Am Basenüberschuß ändert sich auf den niedrigeren Belastungsstufen zunächst wenig, im Gegenteil, er zeigt geringfügig ansteigende Tendenz, die jedoch nicht signifikant ist (vgl. Abb. 5 oben). Mit zunehmender Arbeit kommt es zu einem deutlichen Basendefizit, das sein Maximum mit $-9,5 \text{ mval/l}$ kurz nach Belastungsende aufweist. In der 10. Minute ist ein Teil des Defizits schon wieder ausgeglichen.

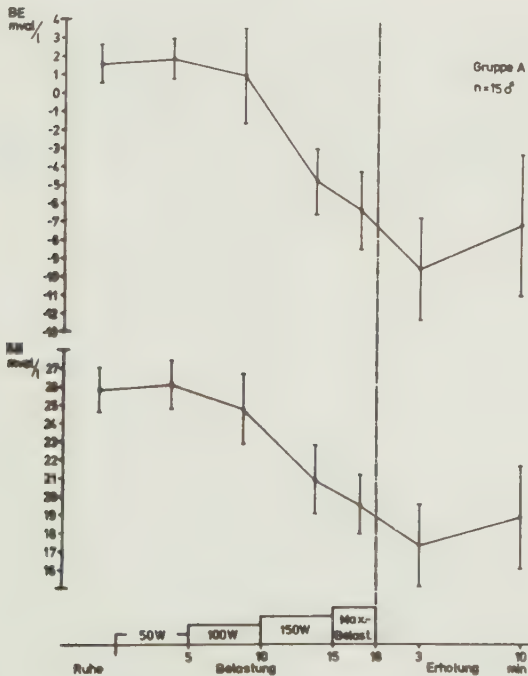


Abb. 5: Gruppe A, Verhalten von base excess (BE) und Standardbikarbonat (SB) während standardisierter Ergometerbelastung mit Standardabweichungen.

6. Standardbikarbonat (SB)

Das Standardbikarbonat (vgl. Abb. 5 unten, s. Seite 12) verändert sich bei niedriger Belastung ebenfalls nur geringfügig, fällt nach der 100-Watt-Stufe jedoch deutlich ab und erreicht sein Minimum mit 17,5 mval/l in der dritten Minute nach Arbeitsabbruch.

7. Kohlensäurepartialdruck (PaCO_2)

Der arterielle Kohlensäurepartialdruck (s. Abb. 4 oben, Seite 11) fällt nach leichtem Anstieg deutlich ab als Ausdruck der respiratorischen Kompensation der durch Laktatanstieg ausgelösten metabolischen Azidose. Im Gegensatz zu den übrigen Parametern des Säuren-Basen-Haushaltes sind die mit 32 mmHg erreichten tiefsten Werte auch zehn Minuten nach Belastungsende noch nicht wieder angestiegen.

IV. Korrelationsstatistische Parameter

Während der Versuchsreihe wurde deutlich, daß zwischen den einzelnen gemessenen physiologischen Größen z.T. lineare Beziehungen bestehen, die für die Veränderungen im Kreislauf und im Säuren-Basenhaushalt schon lange bekannt sind, für das Verhalten des Augenbinnendruckes aber noch nicht beschrieben wurden. Aus diesem Grund erfolgte die Berechnung der Korrelationskoeffizienten und der Regressionsgeraden für die einzelnen Parameter in Beziehung zur oculären Tension.

Die Korrelation wurde getrennt geprüft, erstens bis zum Abbruch der Belastung und zweitens unter Einschluß der Erholungsminuten, da bei den einzelnen Größen zwar eine enge Verbundenheit bis zum Arbeitsabbruch festzustellen war, die sich mit beginnender Erholung aber wieder verringerte oder ganz aufhob. Durch diese getrennte Prüfung war es möglich, weitere Informationen über eventuelle Ursachen und Zusammenhänge der oculären Drucksenkung zu erhalten. Zur Berechnung selbst wurden die Mittelwerte aus den einzelnen Gruppen herangezogen. Die Prüfungen erfolgten sowohl einzeln für jedes Auge als auch für beide Augen zusammen.

Eine Zusammenstellung findet sich im tabellarischen Anhang auf Seite 35. Zur graphischen Darstellung wurden bis auf eine Ausnahme stets die für das rechte Auge gemessenen Werte herangezogen.

1. Herzfrequenz und Augenbinnendruck

Die Herzfrequenz gilt in der Kreislaufphysiologie, insbesondere unter Belastungsbedingungen seit langem als das entscheidende Kriterium der Leistungsfähigkeit. In der Schnelligkeit und der Höhe ihres Anstiegs in bezug auf eine bestimmte Arbeit sind die vielfältigen Veränderungen des Körpers während Muskelarbeit integriert. Da der Organismus nur zu Beginn einer körperlichen Belastung die Mehranforderungen an Umlaufvolumen aus dem enddiastolischen Reservevolumen schöpfen kann (GAUER), wobei gerade hier große Unterschiede zwischen trainierten und untrainierten Personen bestehen (REINDELL und Mitarb., MELLEROWICZ), muß er jede weitere Mehranforderung mit Erhöhung der Frequenz beantworten. Ausgelöst werden diese Vorgänge durch den erhöhten Sauerstoffbedarf der arbeitenden Organe, also vor allem der Muskulatur, sowie den gesteigerten Abtransport von CO_2 und den Zwischenprodukten des Muskelstoffwechsels in Form von Milchsäure und Brenztraubensäure. Es ist bei Kenntnis dieser Tatsachen zu erwarten, daß jede andere Veränderung während körperlicher Belastung in irgendeiner Beziehung zu dem Verhalten der Herzfrequenz stehen muß. Betrachtet man das Verhältnis von Puls und Augenbinnendruck während Belastung (s. Abb. 2, S. 8), so wird ein deutlich entgegengesetztes Verhalten sichtbar: Während sich die Herzfrequenz mit zunehmender Belastung erhöht, sinkt der Augenbinnendruck stetig weiter ab. In den ersten Erholungsminuten kommt es zu

einem sprunghaften Abfall der Pulsfrequenz, während die oculäre Tension nur noch leicht absinkt. In den weiteren Minuten fällt die Herzfrequenz weiter ab, während der Augenbinnendruck relativ schnell wieder ansteigt, also auch hier ein entgegengesetztes Verhalten. Diese schon aus den Kurven zu ersiehenden Beziehungen werden auch deutlich bei Betrachtung der Korrelationskoeffizienten und der Regressionsgeraden (s. Tab. 4, S. 35): Während der Arbeit besteht eine mit $r = -0,88$ ($\alpha \leq 0,001$) signifikant negative Beziehung, die unter Einbeziehung der Erholungswerte auf $r = 0,71$ ($\alpha \leq 0,0027$) sinkt. Entsprechend haben sich Steilheit und Streuung der Regressionsgeraden verändert.

Es läßt sich damit feststellen, daß der Pulsfrequenz beim Zustandekommen der oculären Drucksenkung sicher nur eine mittelbare, jedoch keine direkte Rolle zuzumessen ist.

2. Blutdruck und Augenbinnendruck

Die Beziehungen zwischen arteriellem Blutdruck und Augenbinnendruck während ansteigender Belastung (s. Abb. 2, S. 8) sind bis zum Arbeitsabbruch ebenfalls gekennzeichnet durch eine signifikant negative Verbundenheit. Als wirksamer Blutdruck wurde nach der Formel von BÖGER und WETZLER der arterielle Mitteldruck bestimmt (s. Abb. 6, S. 17) und seine Korrelation zum Augenbinnendruck berechnet (s. Abb. 7, S. 18).

Aus Abb. 6 ist zu entnehmen, daß der arterielle Mitteldruck bis zur Maximalbelastung kontinuierlich ansteigt, in der 3. Ruheminute in allen drei Gruppen etwa wieder die Ausgangswerte erreicht hat und in der 10. Minute nach Arbeitsabbruch ca. 10 mmHg unter dem Ausgangswert liegt. Die Korrelation ist mit $r = -0,83$ ($\alpha \leq 0,001$) bis zum Arbeitsende signifikant negativ, sinkt aber bei Einbeziehung der Erholung auf $r = -0,37$ ($\alpha \leq 0,05$).

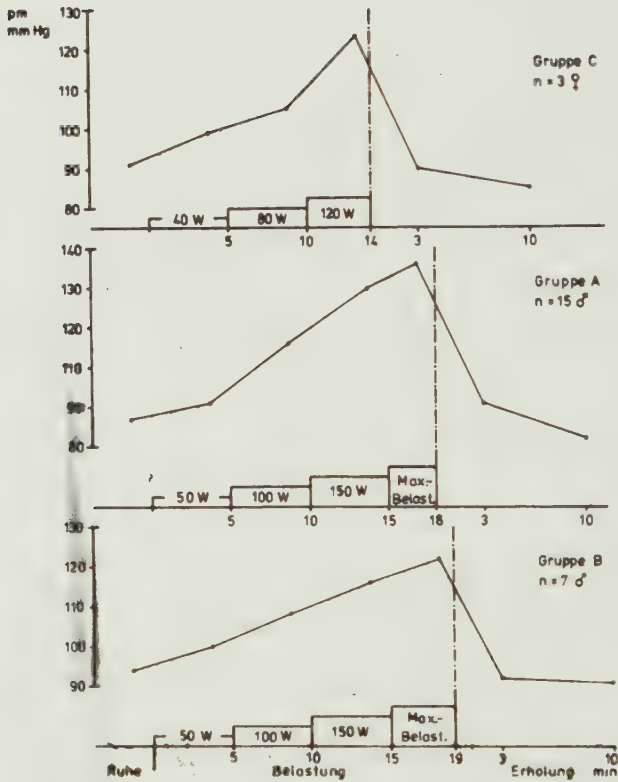


Abb. 6: Gruppe A, B und C, Verhalten des arteriellen Mitteldruckes auf den einzelnen Belastungsstufen nach der Formel von BÖGER und WETZLER:

$$pm = p \text{ diast.} + \frac{(p \text{ syst.} - p \text{ diast.}) \times 42}{100}$$

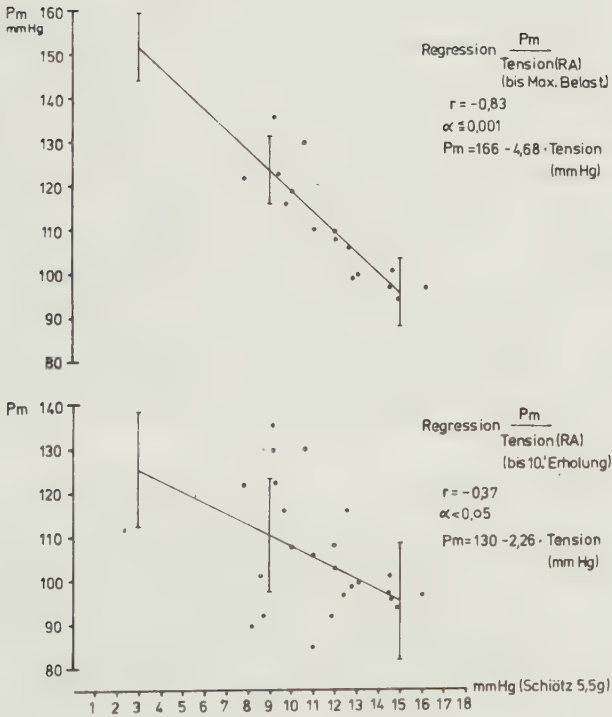


Abb. 7: Gruppe A, Regressionsgeraden und Korrelationskoeffizienten für arteriellen Mitteldruck und oculäre Tension;
oben - Werte bis zum Belastungsende,
unten - Werte unter Einbeziehung der ersten 10 Erholungsminuten.

Entsprechend unterschiedlich fallen die beiden Regressionsgeraden aus (s. Abb. 7, S. 18).

Es soll noch erwähnt werden, daß der diastolische Druck für sich allein betrachtet während der Erholungsphase eine ähnliche Entwicklung zeigt wie der Augenbinnendruck: In den ersten Minuten nach Arbeitsende kommt es zu einem Abfall mit anschließendem langsamen Wiederanstieg. Es ist nicht auszuschließen, daß sich bei orthostatischen Fehlregulationen der vorhandenen Senkung der oculären Tension in den ersten Erholungsminuten noch eine kreislaufbedingte Senkung aufpflanzt. Diese Fragen können aber nur durch weitere Untersuchungen geklärt werden. Insgesamt ist ein Zusammenhang zwischen dem Abfall der oculären Tension und dem Verhalten des Blutdruckes unter den hier dargestellten Arbeitsbedingungen klar zu verneinen.

3. Säuren-Basenhaushalt und Augenbinnendruck

Die Veränderungen im Säuren-Basenhaushalt unter Arbeitsbedingungen bis zur Erschöpfung geben einen Einblick in die Fähigkeit des Körpers, mit den bei Muskelarbeit auftretenden stoffwechselbedingten Störaufschaltungen fertig zu werden. Es liegt auf der Hand und ist in zahlreichen Untersuchungen bewiesen worden (DOLL, KEUL und REINDELL), daß hier deutliche Unterschiede zwischen trainierten und untrainierten Personen bestehen. Eine der am sorgfältigsten konstant gehaltenen physiologischen Größen des Organismus ist der arterielle pH. Da sämtliche Stoffwechselvorgänge, vor allem die enzymatischen Reaktionen, pH-abhängig sind, ist eine differenzierte Regelung Voraussetzung dieser Lebensprozesse überhaupt.

Unter Normalbedingungen wird die H-Ionenkonzentration im Blut aufrecht erhalten durch das Gleichgewicht

zwischen Standardbikarbonat und physikalisch gelöster Kohlensäure, wie es in der H e n d e r s o n - H a s - s e l b a l c h - Gleichung zum Ausdruck kommt.

Während schwerer Arbeit werden etwa ab einer Pulsfrequenz von 120/min (KEUL, DOLL und KEPPLER) zunehmend Milchsäure und Brenztraubensäure sowie freie Fettsäuren aus der arbeitenden Muskulatur abgegeben. Auf das Gleichgewicht im Säuren-Basenhaushalt wirkt sich diese Ausschwemmung fixer Säuren als metabolische Azidose aus. Zunächst ist der Organismus noch in der Lage, durch Beanspruchung des Standardbikarbonates und durch respiratorische Kompensation in Form erhöhter Abatmung von CO_2 einen Teil der fixen Säuren ohne pH-Verschiebung abzufangen. Mit zunehmender Belastung kommt es jedoch zu einer Ansäuerung und weiterer Abnahme des Standardbikarbonates und damit zur Vergrößerung des Basen-defizits.

Da nach einschlägigen Untersuchungen eine signifikante Korrelation zwischen dem Anstieg der Milchsäure und dem Abfall des pH während schwerer körperlicher Arbeit besteht (KEPPLER, KEUL und DOLL, KYPKE und EHRENSTEIN), wurden in der vorliegenden Arbeit nicht die einzelnen fixen Säuren, sondern ihre Auswirkungen auf den Säuren-Basenhaushalt selbst gemessen. Die Ergebnisse sind auf den Abb. 4 (s. S. 11), 5 (s. S. 12) und 8 (s. S. 21) dargestellt.

Schon auf der graphischen Wiedergabe der Mittelwerte von pH, Standardbikarbonat, base-excess, teilweise auch von PaCO_2 und ihrer Standardabweichungen wird ab einer Belastung von etwa 100 Watt eine parallele Entwicklung der Säuren-Basenparameter und der oculären Tension deutlich: Es kommt nach anfänglicher Konstanz bzw. leichtem, jedoch in der methodischen Fehlerbreite liegendem Anstieg der einzelnen Werte zu einem

signifikanten Abfall bis auf ein Minimum in der 3. Erholungsminute und anschließend wieder zu einem langsamen Anstieg.

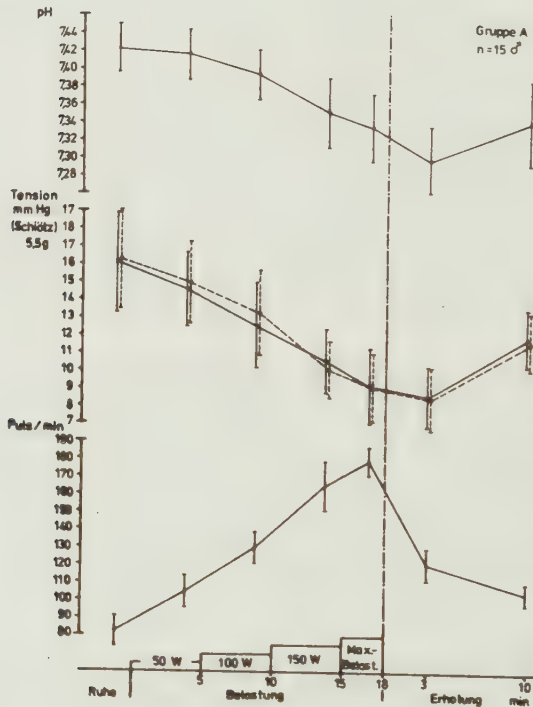


Abb. 8: Gruppe A, Verhalten von Puls, oculärer Tension und pH mit Standardabweichungen auf den einzelnen Belastungsstufen.
(vgl. Text Seite 20)

Die enge Verbundenheit wird auch in den hohen positiven Korrelationen sichtbar, wie sie aus der Abb. 9 und aus der Tab. 4 (s. S. 35) entnommen werden können.

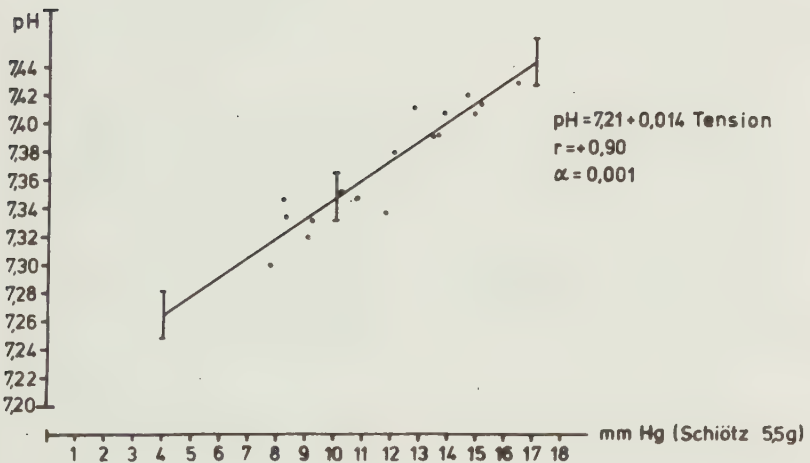


Abb. 9: Gruppe A, Regressionsgerade und Korrelationskoeffizient für die Beziehung zwischen pH und oculärer Tension während und nach körperlicher Belastung (gezeichnet für das linke Auge; auf die Darstellung der Werte bis Arbeitsabbruch wurde wegen der annähernden Identität der Geraden verzichtet (vgl. Tab. 4).

Diese Korrelationen bleiben, im Gegensatz zu den Verhältnissen bei Puls und Blutdruck, auch nach Abbruch der Arbeit fast in vollem Umfang erhalten, so daß sich an den Steigungen der jeweiligen Regressionsgeraden nur wenig ändert. Die engste Verbundenheit besteht mit $r = 0,91$ ($\alpha \leq 0,001$; Korrelationskoeffizient für die Beziehung bis zum Arbeitsabbruch) und $r = 0,89$ ($\alpha \leq 0,001$; Korrelationskoeffizient für die Beziehung unter Einschluß der Erholungsminuten) zwischen pH und oculärer Tension, die geringste mit $r = 0,69$ ($\alpha \leq 0,05$) und $r = 0,67$ ($\alpha \leq 0,01$) zwischen Augenbinnendruck und arteriellem Kohlensäurepartialdruck.

Diese Beobachtung findet unter den gegebenen Bedingungen ihre Erklärung darin, daß der arterielle pH als Regelgröße die Gesamtlage des Säuren-Basengleichgewichtes repräsentiert, während der arterielle Kohlensäurepartialdruck als kompensatorische Größe stärkeren Schwankungen, die teilweise auch von der Atemtechnik abhängig sind, unterliegt.

V. Zusammenfassung der Ergebnisse

1. Schwere Muskularbeit bis zur Leistungsgrenze führt zu einer signifikanten Senkung der oculären Tension.
2. Der Abfall des Augenbinnendruckes ist abhängig von Maß und Dauer der körperlichen Arbeit.
3. In den ersten Erholungsminuten bleibt der Augenbinnendruck auf seinem Tiefstwert, bzw. er fällt noch weiter leicht ab, um dann schnell wieder anzusteigen.
4. Die Senkung des Augenbinnendruckes scheint geschlechtsunabhängig zu sein.
5. Aus dem quantitativ unterschiedlichen Verhalten in den einzelnen Gruppen ist eine Abhängigkeit zwischen körperlicher Leistungsfähigkeit sowie Grad und Eintrittsschnelligkeit der Augenbinnendrucksenkung zu vermuten.
6. Es besteht während Belastung eine signifikant negative Beziehung zwischen oculärer Tension einerseits, Herzfrequenz und Blutdruck andererseits. Diese negative Verbundenheit wird in der Erholungsphase geringer, bzw. geht ganz verloren.
7. Es besteht eine signifikant positive Korrelation zwischen oculärer Tension, arteriellem pH, Standardbikarbonat und base-excess, die auch bis zur 10. Ruheminute keine wesentliche Änderung erfährt. Die Beziehung zum arteriellen Kohlendioxidpartialdruck ist deutlich lockerer und nur auf dem 1%-Niveau signifikant.

VI. Diskussion der eigenen Versuche mit denen der Literatur

Die Messungen des intraocularen Druckes mit dem Schiötz-Tonometer sind mit einer höheren Fehlerbreite behaftet als die applanationstonometrischen Messungen, weil die Rigidität in die Bestimmung eingeht. Trotzdem wurde diese Methode in der vorliegenden Untersuchung angewandt, da sie wegen der Schnelligkeit und Einfachheit ihrer Handhabung gerade für die Messungen während und unmittelbar nach Arbeit im Liegen am geeignetsten erschien. Darüberhinaus kam es nicht auf Absolutwerte, sondern auf Vergleichswerte an, bei denen ein eventueller, von Messung zu Messung sich fortpflanzender methodischer Fehler in Kauf genommen werden konnte; dies allerdings nur unter der Voraussetzung, daß sich während der körperlichen Arbeit die Sklerarigidität nicht ändert, was noch weiterer experimenteller Abklärung bedarf.

Ein leichter Tonographieeffekt bei wiederholten Bestimmungen der oculären Tension in Abständen von 5 Minuten war zu erwarten. Wir führten deshalb an 10 gesunden Versuchspersonen Leerversuche durch, die im

Mittel nach 20 Minuten einen Abfall von 1,05 mmHg, nach 30 Minuten eine Senkung von 1,75 mmHg für das rechte Auge erbrachten. Die entsprechenden Werte für das linke Auge betragen 1,1 mmHg und 1,8 mmHg (vgl. Abb. 10). Dieser geringe Tonographieeffekt muß von der gemessenen Senkung des Augenbinnendruckes abgezogen werden. Untersuchungen zur Abgrenzung des Einflusses der Tonometrie auf die "oculäre Tension" haben HOLTSMANN, KAUFMANN und SCHOTTE durchgeführt und kamen zu gleichen Ergebnissen.

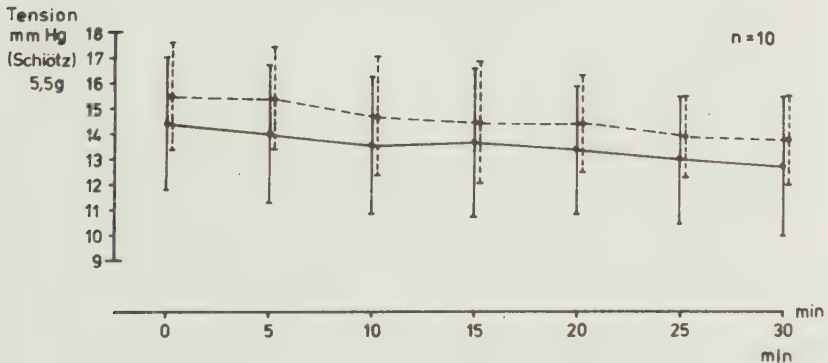


Abb. 10: Tonographieeffekt bei Messungen mit dem Schiötz-Tonometer (5,5 g) in Abständen von 5 Minuten; durchgezeichnet die Werte für rechtes, gestrichelt die für linkes Auge.

Über ähnlich hohe Senkungen des Augenbinnendruckes, wie sie in der vorliegenden experimentellen Studie gefunden wurden, wird in der Literatur bis auf eine Ausnahme nur bei Tierversuchen berichtet. DE JONGH und WOLFF fanden eine Senkung des Augenbinnendruckes bei Hunden von 25 bis 30 % nach künstlich erzeugten Muskelkrämpfen, FILATOW, JERSCHKOVITCH und CHEVALOV sahen nach Laufversuchen an Kaninchen Senkungen zwischen 8 bis 10 mmHg. Vergleichbare Werte wurden von KÜCHLE und ROHRSCHEIDER, ebenfalls an Kaninchen, nach Laufen bis zur Erschöpfung gefunden.

Beim Menschen finden sich Angaben über derartige Minderungen des Augenbinnendruckes bei LEMPERT und Mitarb. Hier liegen die Drucksenkungen bei Normalpersonen zwischen 1 mmHg und 8 mmHg, im Durchschnitt bei 4,9 mmHg für das rechte und 4,3 mmHg für das linke Auge. Diese Autoren sind auch die einzigen, die vergleichbare Belastungen bis zur Leistungsgrenze untersucht haben, wobei als notwendiges Kriterium eine Herzfrequenz von 180/min erreicht werden mußte. Es ist deshalb nicht verwunderlich, daß die angegebenen Werte nur geringe quantitative Differenzen zu den eigenen Ergebnissen aufweisen. Erstmalig haben diese Untersucher an 4 Personen auch Messungen während der Arbeit vorgenommen. Sie berichten über einen Abfall des Augenbinnendruckes kurz nach Beginn der Arbeit und über einen weiteren stetigen Abfall während der Arbeit. Es werden jedoch keine Angaben über die gefundenen Werte gemacht. Die vorliegende Untersuchung ist somit die erste, die beim Menschen über die Entwicklung der oculären Tension während reproduzierbarer, standardisierter körperlicher Belastung genauere Aufschlüsse vermittelt. Wenn zahlreiche andere Autoren geringere oder gar keine Veränderungen des Augenbinnendruckes nach

Muskularbeit gefunden haben, so liegt dies in den meisten Fällen an einer entsprechend geringeren Arbeitsbelastung oder daran, daß vorwiegend Haltearbeit durchgeführt wurde. Es ist zu vermuten, daß die 1929 von BARDANZELLU an 9 Soldaten gemachte Beobachtung eines teilweisen parallelen Anstiegs von Blutdruck und Augenbinnendruck durch die besondere Belastung beim Bergsteigen zu erklären ist, da er mit Einsetzen der Erholung normale Werte, teilweise sogar Werte unter der Norm erhielt.

In der vorliegenden Untersuchung konnte ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen Augenbinnendruckveränderungen und azidotischer Verschiebung des Säuren-Basengleichgewichtes aufgezeigt werden.

In der Literatur finden sich zahlreiche Hinweise, die in dieser oder jener Weise auf Zusammenhänge der Augenbinnendrucksenkung mit dem Muskelstoffwechsel schließen lassen. WOLFF und DE JONGH injizierten das nach künstlich ausgelösten Muskelkrämpfen gewonnene Serum von Versuchstieren, bei denen es zu einer Senkung der okulären Tension gekommen war, anderen Tieren und fanden bei diesen ebenfalls ein Absinken des Augenbinnendruckes. Sie postulierten eine spezifisch augendrucksenkende Substanz, die sie "Antitonon" nannten und bemühten sich um ihre Darstellung.

FILATOW, JERSCHKOVITCH und CHEVALOV übertrugen nach Laufversuchen an Kaninchen unmittelbar von dem "Ermüdungsblut" auf ein nicht ermüdetes Tier und konstatierten ebenfalls eine Drucksenkung.

In Kenntnis dieser Beobachtungen schlossen KÜCHLE und ROHRSCHEIDER daraus, daß entweder die Zwischenprodukte des Muskelstoffwechsels oder eine bei Muskularbeit entstehende Substanz für die beobachteten Phänomene verantwortlich zu machen seien. In direkter Konsequenz

dieser Überlegungen führten sie Tierversuche durch, indem sie Kaninchen zunächst Milchsäure und Brenztraubensäure in hohen Dosen injizierten und anschließend den Augenbinnendruck über 70-80 Minuten kontrollierten. Eine deutliche Senkung fand sich jedoch nur bei einem einzigen Tier, das die höchste Dosis Brenztraubensäure erhalten hatte.

Für den negativen Ausgang dieser Versuche lassen sich mehrere Erklärungen finden. Nach den Untersuchungen von KEUL und Mitarb. extrahiert der ruhende Muskel ständig Laktat und Pyruvat aus dem arteriellen Blut. Somit wird, auch bei hohen Injektionsdosen, ein Teil der gewünschten Wirkung sofort durch den Muskel selbst abgefangen. Darüberhinaus trifft diese künstlich erzeugte metabolische Azidose auf ein voll funktionstüchtiges Puffersystem und kann schnell durch Gegenregulationen abgefangen werden, ohne daß es zu einer wesentlichen pH-Verschiebung gekommen ist.

Im Vergleich mit den eigenen Versuchen läßt sich vermuten, daß nicht die genannten fixen Säuren selbst, sondern erst ihre mittelbare Wirkung über die metabolische Azidose zu einer Senkung der okulären Tension führen. In einer zweiten Serie injizierten die genannten Autoren ihren Kaninchen "Ermüdungsblut" von Tieren nach Laufbelastung und "Krampfserum" von Tieren, bei denen durch Elektroschock Muskelkrämpfe ausgelöst worden waren. Sie fanden Augenbinnendrucksenkungen in einem Viertel bis einem Drittel der Versuchstiere, in gleicher Häufigkeit wie bei parallel dazu vorgenommenen Leerversuchen. Die Autoren führten diese zunächst zufällig erscheinenden Augenbinnendrucksenkungen auf Sensibilisierung ihrer Tiere durch mehrfache Injektionen mit Fremdserum und auf schockähnliche Mechanismen zurück. Einen Zusammenhang mit dem Muskelstoffwechsel konnten sie nicht herstellen.

Auch hier gibt es mehrere Erklärungen. Zunächst erscheint es fraglich, ob eine Menge von 10 bis 20 ccm Serum genügte, die erwarteten Veränderungen des Augenbinnendruckes auszulösen. Darüberhinaus wurde das Serum den Tieren, die schwere Muskularbeit geleistet hatten, ebenso wie den Kaninchen, die durch Elektroschock vorbehandelt waren, erst 10 bis 15 Minuten nach Ende der entsprechenden Maßnahmen entnommen. Sofern man hier die Vorgänge bei Mensch und Tier gleichsetzen darf, war zu diesem Zeitpunkt ein beträchtlicher Teil der metabolischen Azidose schon wieder ausgeglichen. Zusätzlich gilt auch hier, daß die Seruminjektionen auf ein völlig intaktes Puffersystem stießen.

Betrachtet man die gesamte einschlägige Literatur von der Vorstellung her, daß die Verschiebungen im Säuren-Basenhaushalt während erschöpfender körperlicher Arbeit ursächlich für die Senkung des Augenbinnendruckes verantwortlich zu machen sind, lassen sich die zunächst widersprüchlich erscheinenden Ergebnisse der verschiedenen Autoren wohl ohne Schwierigkeiten auf einen Nenner bringen: Das Ausmaß der erreichten Azidose ist von Höhe und Dauer der Muskularbeit abhängig und somit auch das Ausmaß der Augenbinnendrucksenkung. Des weiteren findet sich eine Erklärung dafür, daß unmittelbar nach Abbruch der Belastung die größten Senkungen der oculären Tension gemessen werden, da zu diesem Zeitpunkt der Spiegel der fixen Säuren am höchsten und der arterielle pH am niedrigsten liegen. Selbst so entgegengesetzte Befunde, wie die Messungen von KERN an Offiziersschülern nach 50 und 100 km Patrouillen, bei denen er in 65 % eine leichte Drucksteigerung und nur in 15 % einen Abfall fand, lassen sich einordnen, da bei derartig langfristiger Muskelarbeit unterhalb der Dauerleistungsgrenze ganz andere

Stoffwechselvorgänge im Vordergrund stehen und es nicht zu einer metabolischen Azidose kommt (KEUL und Mitarb.).

Keine Erklärung durch die Veränderungen im Säuren-Basenhaushalt finden die auch in den eigenen Versuchen gemessenen leichten Augenbinnendrucksenkungen bei Belastungen bis etwa 100 Watt, entsprechend einer Herzfrequenz bis etwa 120/min. Zu diesem Zeitpunkt ist es noch zu keinen sicher meßbaren Stoffwechselveränderungen gekommen. Hier könnten kreislauf- und atmungsbedingte Umstellungen in den Vordergrund treten, wie sie LEIGHTON und PHILIPPS z.B. in einer Verminderung des Jugularvenendruckes diskutieren. Auch lokal wirkende Mechanismen, wie ein denkbarer Tonographieeffekt durch Liddruck oder Zugwirkung der äußeren Augenmuskeln durch Anspannung während Arbeit müssen in Betracht gezogen werden.

Neueste Veröffentlichungen weisen darauf hin, daß möglicherweise auch bei pharmakologisch ausgelöster Bulbushypotonie eine metabolische Azidose nachzuweisen ist (BIETTI und Mitarb.). Diese Beobachtung würde die auf Grund der eigenen Versuche vorgetragenen Vorstellungen unterstreichen.

Die eindeutige Beantwortung der Frage, wo der Angriffspunkt der beobachteten Augenbinnendrucksenkung während der Belastung liegt, muß jedoch weiteren experimentellen Untersuchungen vorbehalten bleiben.

VII. Tabellarischer Anhang

Tab. 1 : Daten der Versuchspersonen

	Name	Alter	Größe	Gewicht	Beruf
Gruppe A	L.B.	28	178	68 kg	Student
(n = 15)	K.H.	29	183	78 kg	Student
♂	S.K.	25	169	79 kg	Student
	K.W.	31	176	66 kg	Arzt
	B.D.	27	177	65 kg	Student
	F.M.	27	178	77 kg	Student
	S.M.	24	176	65 kg	Beamter
	R.H.	24	178	64 kg	Beamter
	G.R.	24	180	66 kg	Beamter
	H.J.	31	176	71 kg	Arzt
	J.G.	27	170	68 kg	Student
	E.R.	30	187	77 kg	Beamter
	B.R.	31	182	75 kg	Arzt
	K.A.	25	170	62 kg	Beamter
	T.J.	24	174	64 kg	Student
Gruppe B	S.K.	22	178	65 kg	Student
(n = 7)	H.K.	23	187	78 kg	Student
♂	J.R.	24	175	68 kg	Student
	W.M.	23	187	85 kg	Beamter
	A.J.	26	182	77 kg	Student
	H.K.	30	179	75 kg	Student
	M.P.	32	177	72 kg	Beamter
Gruppe c	R.B.	27	162	54 kg	Orthoptistin
(n = 3)	S.U.	22	170	57 kg	Studentin
♀	H.S.	18	167	52 kg	Schülerin

Tab. 1.2 Mittelwerte mit Standardabweichungen der Gruppe A und B, Mittelwerte der Gruppe C.

	Gruppe A (n = 15)					Gruppe B (n = 7)					Gruppe C (n = 3)				
	Ruhe					Ruhe					Ruhe				
	50 Watt	100 Watt	150 Watt	max. Belastung	3 ^{er} post	10 ^{er} post	50 Watt	100 Watt	150 Watt	max. Belastung	3 ^{er} post	10 ^{er} post	50 Watt	100 Watt	150 Watt
♂	Puls	82,53 ± 8,18	104,66 ± 9,34	129,80 ± 9,51	164,80 ± 13,90	178,73 ± 7,58	121,26 ± 8,19	105,42 ± 5,62							
	aktuell- ler pH	7,423 ± 0,028	7,397 ± 0,028	7,394 ± 0,028	7,351 ± 0,039	7,333 ± 0,039	7,298 ± 0,037	7,299 ± 0,046							
	PO ₂	40,60 ± 3,14	41,9 ± 2,94	41,35 ± 3,29	37,31 ± 3,68	35,11 ± 4,51	32,16 ± 3,25	31,90 ± 3,79							
	BE	1,55 ± 0,98	1,86 ± 1,07	0,99 ± 2,62	- 4,65 ± 1,96	- 6,31 ± 2,09	- 9,54 ± 2,95	- 7,06 ± 3,89							
	SB	23,83 ± 1,22	26,12 ± 1,32	24,80 ± 1,94	20,96 ± 1,88	19,58 ± 1,67	17,35 ± 2,15	18,87 ± 2,82							
	RA	16,06 ± 2,84	14,60 ± 2,04	12,60 ± 2,49	10,60 ± 1,80	9,20 ± 2,12	8,61	14,86 ± 1,63							
	LA	16,26 ± 2,82	14,96 ± 2,26	13,30 ± 2,45	10,10 ± 1,58	9,06 ± 1,85	8,53 ± 1,84	11,73 ± 1,56							
	RA + LA	16,16 ± 2,78	14,78 ± 2,12	12,96 ± 2,35	10,39 ± 1,68	9,13 ± 1,96	8,58 ± 1,70	11,80 ± 1,57							
	myot.	126,6 ± 12,3	141,3 ± 17,0	161,6 ± 16,8	188,6 ± 16,3	202,0 ± 14,2	154,0 ± 14,9	119,6 ± 10,2							
	RR diast.	76,0 ± 8,0	81,3 ± 8,54	84,6 ± 8,5	88,6 ± 10,7	88,3 ± 11,1	65,6 ± 9,9	73,3							
♀	Puls	67,71 ± 8,11	89,14 ± 7,10	109,71 ± 9,95	138,00 ± 13,29	152,50 ± 7,44	111,85 ± 10,68	88,28 ± 9,65							
	aktuell- ler pH	7,412 ± 0,02	7,414 ± 0,014	7,39 ± 0,022	7,367 ± 0,019	7,353 ± 0,028	7,335 ± 0,033	7,373 ± 0,039							
	PO ₂	40,80 ± 4,16	41,08 ± 2,75	40,63 ± 2,45	38,91 ± 2,93	36,31 ± 4,87	34,03 ± 5,38	34,85 ± 2,91							
	BE	2,02 ± 2,25	1,70 ± 1,30	0,08 ± 2,16	- 2,2 ± 1,96	- 4,06 ± 3,62	- 6,16 ± 3,66	- 3,45 ± 2,96							
	SB	25,08 ± 3,12	25,88 ± 1,72	24,43 ± 1,95	22,51 ± 1,56	21,11 ± 2,76	19,56 ± 2,49	21,60 ± 2,35							
	RA	14,92 ± 1,66	13,14 ± 2,44	12,00 ± 2,36	9,66 ± 1,98	8,20 ± 1,92	8,66 ± 1,85	12,21 ± 1,24							
	LA	14,78 ± 1,47	12,58 ± 2,25	11,28 ± 2,13	9,16 ± 2,15	8,71 ± 1,70	8,33 ± 1,8	11,57 ± 0,79							
	RA + LA	14,85 ± 1,50	12,88 ± 2,26	11,64 ± 2,19	9,33 ± 2,06	8,44 ± 1,75	8,30 ± 1,47	11,89 ± 1,05							
	myot.	120,71 ± 8,89	131,42 ± 13,50	148,57 ± 16,51	170,00 ± 21,21	185,00 ± 23,09	156,42 ± 14,53	118,57 ± 8,53							
	RR diast.	75,00 ± 7,65	77,14 ± 7,00	79,28 ± 12,74	77,85 ± 12,56	77,85 ± 13,82	60,71 ± 7,33	71,42 ± 5,65							
max. Belastung															
	88	113	134	174	124	114	88	113	134	174	124	114	88	113	134
aktuell- ler pH	7,447	7,428	7,396	7,322	7,303	7,351	7,447	7,428	7,396	7,322	7,303	7,351	7,447	7,428	7,396
RA	14,5	12,8	11,0	9,3	8,5	11,0	14,5	12,8	11,0	9,3	8,5	11,0	14,5	12,8	11,0
LA	14,5	13,6	12,0	9,3	8,0	10,7	14,5	13,6	12,0	9,3	8,0	10,7	14,5	13,6	12,0

Tab.: 3 Leerversuche bei 10 Probanden, Augeninnendruckwerte in mmHg (Schiötz 5,5g).

Proband		Ruhe	5.'	10.'	15.'	20.'	25.'	30.'
C. S.	RA	14,5	13,0	13,0	14,5	14,5	14,5	14,5
	LA	14,5	14,5	13,0	14,5	14,5	14,5	14,5
. S.	RA	14,5	14,5	13,0	14,5	14,5	13,0	13,0
	LA	14,5	14,5	13,0	14,5	14,5	13,0	13,0
S. B.	RA	14,5	14,5	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0
	LA	14,5	14,5	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0
H. A.	RA	16,0	14,5	14,5	14,5	14,5	13,0	13,0
	LA	17,0	16,0	16,0	14,5	14,5	14,5	14,5
H. J.	RA	14,5	14,5	14,5	14,5	13,0	13,0	12,0
	LA	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	13,0
B. A.	RA	20,5	20,5	20,5	20,5	19,0	19,0	19,0
	LA	20,0	20,5	20,5	20,5	19,0	17,0	17,0
J. K.	RA	14,5	14,5	13,0	12,0	12,0	12,0	12,0
	LA	17,0	17,0	16,0	14,5	14,5	14,5	14,5
K. V.	RA	12,0	11,0	11,0	11,0	11,0	10,0	10,0
	LA	14,5	14,5	12,0	12,0	13,0	12,0	12,0
S. P.	RA	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	11,0
	LA	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	13,5	14,5
W. S.	RA	11,0	11,0	11,0	10,0	10,0	10,0	9,0
	LA	13,5	13,5	13,5	12,0	12,0	11,0	11,0
Mittel- werte und Stan- dardab- weichung	RA	14,40 ($\pm 2,64$)	14,00 ($\pm 2,71$)	13,55 ($\pm 2,72$)	13,65 ($\pm 2,90$)	13,35 ($\pm 2,50$)	12,95 ($\pm 2,54$)	12,65 ($\pm 2,74$)
	LA	15,50 ($\pm 2,09$)	15,40 ($\pm 2,03$)	14,70 ($\pm 2,35$)	14,45 ($\pm 2,37$)	14,40 ($\pm 1,85$)	13,85 ($\pm 1,66$)	13,70 ($\pm 1,66$)

RA und LA in Ruhe: 14,95

RA und LA nach 7 Messungen: $13,70 \pm 2,29$

Tab.:4 Korrelationsstatistische Beziehungen zwischen Augeninnendruck und den Parametern aus dem Säurebasenhaushalt, sowie Puls und pm (mittlerer RR) bei ansteigender steady-state-Belastung.

		r	α	Regressionsgerade	syx
pH	RA	0,89	$\alpha \leq 0,001$	$pH = 7,2008 + 0,0147 \text{ Tension}$	0,026
	LA	0,90	$\alpha \leq 0,001$	$pH = 7,2102 + 0,014 \text{ Tension}$	0,017
	RA und LA	0,90	$\alpha \leq 0,001$	$pH = 7,2059 + 0,0143 \text{ Tension}$	0,020
	RA x)	0,91	$\alpha \leq 0,001$	$pH = 7,2323 + 0,0127 \text{ Tension}$	0,014
BE	RA	0,79	$\alpha \leq 0,001$	$BE = -19,00 + 1,38 \text{ Tension}$	2,50
	LA	0,83	$\alpha \leq 0,001$	$BE = -18,13 + 1,31 \text{ Tension}$	2,40
	RA und LA	0,80	$\alpha \leq 0,001$	$BE = -18,42 + 1,33 \text{ Tension}$	2,48
	RA x)	0,83	$\alpha \leq 0,001$	$BE = -14,45 + 1,09 \text{ Tension}$	1,73
Tension (mmHg)	LA x)	0,84	$\alpha \leq 0,001$	$BE = -13,90 + 1,04 \text{ Tension}$	1,71
	RA	0,82	$\alpha \leq 0,001$	$SB = 9,19 + 1,10 \text{ Tension}$	1,83
	LA	0,84	$\alpha \leq 0,001$	$SB = 9,85 + 1,05 \text{ Tension}$	1,80
	RA und LA	0,83	$\alpha \leq 0,001$	$SB = 9,59 + 1,07 \text{ Tension}$	1,78
SB	RA x)	0,88	$\alpha \leq 0,001$	$SB = 11,78 + 0,95 \text{ Tension}$	1,28
	LA x)	0,86	$\alpha \leq 0,001$	$SB = 12,44 + 0,89 \text{ Tension}$	1,34
	RA und LA x)			$SB = 12,10 + 0,92 \text{ Tension}$	1,30
PaCO ₂	RA	0,67	$\alpha \leq 0,01$	$PaCO_2 = 23,48 + 1,13 \text{ Tension}$	3,02
	LA	0,68	$\alpha \leq 0,0027$	$PaCO_2 = 24,12 + 1,08 \text{ Tension}$	2,96
	RA und LA	0,67	$\alpha \leq 0,001$	$PaCO_2 = 23,84 + 1,10 \text{ Tension}$	3,00
	RA x)	0,69	$\alpha \leq 0,05$	$PaCO_2 = 27,71 + 0,84 \text{ Tension}$	1,98
Tension (mmHg)	LA x)	0,72	$\alpha \leq 0,01$	$PaCO_2 = 29,11 + 0,77 \text{ Tension}$	1,88
	RA und LA x)	0,73	$\alpha \leq 0,001$	$PaCO_2 = 28,87 + 0,79 \text{ Tension}$	1,92
pm	RA	-0,37	$\alpha < 0,05$	$pm = 130,33 - 2,26 \text{ Tension}$	13,22
	LA	-0,33	$\alpha < 0,05$	$pm = 125,57 - 1,86 \text{ Tension}$	13,47
	RA und LA	-0,31	$\alpha < 0,05$	$pm = 125,82 - 1,91 \text{ Tension}$	13,37
	RA x)	-0,83	$\alpha \leq 0,001$	$pm = 166,09 - 4,68 \text{ Tension}$	7,52
Puls(P)	RA	-0,71	$\alpha \leq 0,0027$	$P = 222,84 - 9,07 \text{ Tension}$	21,27
	LA	-0,65	$\alpha \leq 0,0027$	$P = 207,20 - 7,77 \text{ Tension}$	23,00
	RA und LA	-0,68	$\alpha \leq 0,0027$	$P = 214,42 - 8,37 \text{ Tension}$	22,21
	RA x)	-0,88	$\alpha \leq 0,001$	$P = 276,09 - 12,75 \text{ Tension}$	15,91
Tension (mmHg)	LA x)	-0,85	$\alpha \leq 0,001$	$P = 2,63,17 - 11,63 \text{ Tension}$	18,07

r = Korrelationskoeffizient

α = Signifikanz

y (Regressionsgerade) = $a + bx$

syx = Standardabweichung der Regressionsgerade

x) = ohne Ruhewerte

VIII. Literaturverzeichnis

1. BARDANZELLU, T.: Ricerche sulla tensione oculare
in oculi normali di soldati alle
manovre alpini invernali
Boll. Ocul. 8 (1929) 1281
Ref. Zbl. Ophthalm. 23 (1930) 317
2. BIETTI, G.B., Blutazidose und Augeninnendruck
M. VIRNO, J. PECORI- Klin. Mbl. Augenheilk. 160 (1972) 7
GIRALDO und
P. PIVETTI-PEZZI:
3. BIRO, I. und Über das Verhalten des Augendruckes
F. BOTAR: bei verschiedenen Sportleistungen
Klin. Mbl. Augenheilk. 140 (1962) 23
4. COMBERG, W. und Die augendrucksteigernde Wirkung
E. STOEWER: verschiedenen Muskelaktionen und
ihre Bedeutung für klinische
Verhältnisse
Z. Augenheilk. 58 (1926) 92

5. DOLL, E. und I. KEUL: Zum Stoffwechsel des Skelettmuskels II. Mitt. Sauerstoffdruck, Kohlendioxiddruck, pH, Standardbikarbonat und base excess im venösen Blut der arbeitenden Muskulatur. Untersuchungen an Hochleistungssportlern
Pflügers Arch. ges. Physiol. 301 (1968 a) 214
6. DOLL, E., I. KEUL und H. REINDELL: Das Verhalten von Sauerstoffdruck, Kohlendioxiddruck, pH, Standardbikarbonat und base excess im arteriellen Blut bei verschiedenen Belastungsformen
Int. Z. angew. Physiol. Arbeitsphysiol. 22 (1966) 237
7. FILATOW, V.P.: Die Rolle der Muskularbeit bei der Regulierung des intraocularen Druckes bei Glaukom
Vestn. Oftalm. 11 (1937) 151
Ref. Zbl. Ophthalm. 40 (1938) 574
8. FILATOW, V.P., I.G. JERSCHKOVITCH und V.E. CHEVALOV: Experimentelle Studien über die Wirkung der Muskularbeit auf den Augeninnendruck
Vestn. Oftalm. 11 (1937) 161
Ref. Zbl. Ophthalm. 40 (1938) 574
9. FILATOW, V.P., I.G. JERSCHKOVITCH und A.G. FISCHER: Die Wirkung einiger Sportübungen auf den Augendruck
Vestn. Oftalm. 11 (1937) 154
Ref. Zbl. Ophthalm. 40 (1938) 574

10. GAUER, O.H.: Kreislauf des Blutes,
in Landois-Rosemann, Lehrbuch der
Physiologie des Menschen,
Urban und Schwarzenberg,
München-Berlin 1960
11. HOLTMANN, H.W., Über die Wirkung eines akuten Sauer-
H. KAUFMANN und stoffmangels auf den intraocularen
J.F. SCHOTTE: Druck

Albrecht v. Graefes Arch. klin.
exp. Ophthal. 182 (1971) 147
12. JANISZEWSKA- Changes in intraocular pressure
ZYGIER, A.: after effort

Klin. Oczna 33 (1963) 385
13. JERSCHKOVITCH, I.G. Die Augendruckveränderungen bei den
und V.E. CHEVALOV: Hunden unter der Wirkung einer
 dosierten Muskularbeit

Vestn. Oftalm. 11 (1937) 168
Ref. Zbl. Ophthalm. 40 (1938) 575
14. DE JONGH, S.E. Augendruckerniedrigung nach Krampf
und L.K. WOLFF: Acta neurol. Physiol. 2 (1932) 9
 Ref. Zbl. ges. Ophthal. 27 (1932) 608
15. KAUFMANN, H., Verhalten des Augeninnendruckes
J.E. SCHOTTE und bei Hyperventilation
H.W. HOLTMANN: Pflügers Arch. ges. Physiol.
 319 (1970) 62

16. KEPPLER, D.,
J. KEUL and
E. Doll:
The influence of the form of exercise
on the arterial concentrations of
glucose, lactate, pyruvate and free
fatty acids
In: Biochemistry of exercise,
Ed.: J.R. Poortmans, Basel-New York 1969
17. KERN, R.:
Effect of prolonged and excessive
physical activity on ocular pressure,
blood pressure and body weight
Ophthalmologica 147 (1964) 82
18. KEUL, J.,
E. DOLL und
D. KEPPLER:
Muskelstoffwechsel,
Wissenschaftl. Schriftenreihe d. Dtsch.
Sportbundes Bd. 9
J.A. Barth-Verlag, München 1969
19. KEUL, J.,
E. DOLL,
D. KEPPLER und
H. REINDELL:
Die Veränderungen arterieller Substrat-
spiegel unter dem Einfluß körperlicher
Arbeit
Int. Z. angew. Physiol. Arbeitsphysiol.
22 (1966) 356
20. KÜCHLE, H.J. und
W. ROHRSCHEIDER:
Elektroschock und Augenbinnendruck I.
Graefes Arch. Opth. 159 (1957) 88
Elektroschock und Augenbinnendruck II.
Graefes Arch. Opth. 159 (1957) 433
21. KYPKE, W. und
W. EHRENSTEIN:
Training auf dem Fahrradergometer im
mittleren Lebensalter - eine 10wöchige
Längsschnittstudie -
Z. f. Kreislaufforschung 59 (1970) 534

22. KYPKE, W. und J. HÖLLGE: Augenbinnendruck in Abhängigkeit von dosierter körperlicher Belastung
Referat, gehalten auf der Tagung der Berliner Augenärztlichen Gesellschaft am 4./5. 12. 1971
23. LEIGHTON, D.A. and C.I. PHILLIPS: Effect of moderate exercise on the ocular tension
Brit. J. Ophthal. 54 (1970) 599
24. LEMPERT, P., K.H. COOPER, J.F. CULVER and T.J. TREDICI: The effect of exercise on intraocular pressure
Amer. J. Ophthal. 63 (1967) 1673
25. MELLEROWICZ, H.: Ergometrie. Grundriß der medizinischen Leistungsmessung für innere Medizin, Arbeitsmedizin, Sportmedizin, Versorgungsmedizin
München-Berlin 1962
26. REINDELL, H., H. KLEPZIG, H. STEIM, K. MUSSHOFF, H. ROSKAMM und E. SCHILDGE: Herz-Kreislauf-Krankheiten und Sport. Wissenschaftl. Schriftenreihe d. Dtsch. Sportbundes Bd. 3
München 1960
27. ROSEN, D.A. and V.C. JOHNSTON: Ocular pressure pattern in the Valsalva maneuver A.M.A.
Arch. Ophthal. 62 (1959) 810
28. SACHS, L.: Statistische Auswertungsmethoden
Berlin-Göttingen-Heidelberg 1968

29. SAVERUCHA, F.M. und V.I. TEBENICHINA: Der Einfluß der Muskelermüdung auf den Druck im Auge
Vestn. Oftalm. 13 (1938) 489
Ref. Zbl. Ophthalm. 43 (1939) 574
30. SEDAN, J.: De l'abaissement du tonus oculaire et de la P.A.R. apres la fatigue musculaire
Rev. d'Otol. etc. 19 (1947) 114
Ref. Zbl. Ophthalm. 52 (1950) 154
31. SIGGAARD-ANDERSEN, O.: The Acid-Base-Status of the Blood
3. Aufl., Kopenhagen 1967
32. STEWARDT, R.H., M.D. LE BLANC, and B. BECKER: Effect of exercise on aqueous dynamics
Amer. J. Ophthal. 69 (1970) 245
33. WETZLER, K. und A. BÖGER: Erg. Physiol. 41 (1939)
34. WOLFF, L.K. und S.E. DE JONGH:
1. Über eine augendruckerniedrigende Substanz
Klin. Wschr. 1925, 344
2. Über eine Substanz, die imstande ist, den Augendruck herabzusetzen
Biochem. Z. 163 (1925) 428
3. Über augendruckerniedrigende Mittel beim Glaukom
Klin. Wschr. 1925, 2489

Herrn Prof. Dr. J. WOLLENSAÛK

danke ich für die Überlassung des Themas,
für die mir jederzeit gewährte freundliche
Unterstützung bei der Durchführung der
Arbeit danke ich Herrn Dr. W. KYPKE.

LEBENS LAUF

Am 11. Juni 1939 wurde ich als Sohn des Postrats Eberhard H ö l l g e und seiner Ehefrau Annaliese geb. Martin in Potsdam geboren.

In Neustrelitz besuchte ich von 1946 bis 1954 die Grundschule und anschließend vier Jahre die Oberschule. Nach dem Abitur im Frühjahr 1958 verließ ich die DDR, um in der BRD studieren zu können. Nachdem ich 1959 das Abitur in Tübingen nachgemacht hatte, begann ich dort mit dem Studium der Humanmedizin. 1960 wechselte ich an die Universität Erlangen, legte dort 1963 das Physikum ab und bestand im März 1967 das Staatsexamen. Anschließend folgte eine zweijährige Medizinal-Assistentenzeit im Kreiskrankenhaus Peine.

Seit Juli 1969 bin ich Mitarbeiter in einer Landpraxis in Strackholt (Ostfriesland). Zwischenzeitlich war ich von Januar bis August 1971 als Angestellter des Berliner Senats an der Augenklinik der Freien Universität Berlin, Klinikum Westend, beschäftigt.

